

# **Memoria de Ejecución del Proyecto**

**PROYECTO DE INNOVACIÓN Y MEJORA DOCENTE  
CURSO 2016/2017**

Título del proyecto:

**Elaboración de material docente para la  
enseñanza de electromagnetismo en materiales  
avanzados**

**Código del proyecto: ID2016/246**

Coordinador del proyecto:

**Marcelino Zazo Rodríguez**

Facultad de Ciencias  
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

# ÍNDICE

<b>I.- Relación de los miembros de la Universidad de Salamanca participantes en el proyecto .....</b>	<b>1</b>
<b>II.- Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>III.- Cumplimiento de objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>IV.- Memoria económica .....</b>	<b>5</b>
<b>V.-Anexos:</b>	
<b>Anexo I.- Ejemplo de presentación de una clase magistral.....</b>	<b>6</b>
<b>Anexo II.- Ejemplo de guion de práctica de una experiencia.....</b>	<b>8</b>
<b>Anexo III.- Ejemplo de presentación teórica introductoria a las prácticas de simulación en el aula de informática.....</b>	<b>13</b>
<b>Anexo IV.- Ejemplo de tareas individuales para el alumno y que entregará al profesor para su revisión .....</b>	<b>15</b>
<b>Anexo V.- Fotografías de experiencia de laboratorio.....</b>	<b>16</b>

## **I. Relación de los miembros de la Universidad de Salamanca participantes en el proyecto**

María Auxiliadora Hernández López

Luis López Díaz

Luis Torres Rincón

Marcelino Zazo Rodríguez

## **II. Introducción**

El presente documento presenta la Memoria de Ejecución del Proyecto titulado “Elaboración de material docente para la enseñanza de electromagnetismo en materiales avanzados”, concedido dentro de la convocatoria del Programa de Mejora de la Calidad (Proyectos de innovación y mejora) del curso 2016/2017.

Hay que indicar que la implantación del nuevo Máster de Física y Matemáticas implica la tarea de realizar nuevo material docente para cada una de las asignaturas. El objetivo principal de este proyecto es elaborar los recursos docentes necesarios para la asignatura de Electromagnetismo en materiales avanzados y aplicaciones, incluida dentro de la especialidad de Física Aplicada. Es una asignatura importante de dicha especialidad, ya que en las aplicaciones tecnológicas actuales es necesario caracterizar los materiales desde el punto de vista electromagnético. El empleo de un material u otro para la fabricación de distintos dispositivos electrónicos en muchas ocasiones depende de sus propiedades electromagnéticas.

Por otro lado, a la hora de la preparación de la asignatura se ha tenido en cuenta el semestre en el que se imparte y la afinidad con otras asignaturas que se imparten dentro de la especialidad de Física Aplicada del Máster de Física y Matemáticas. Dicha asignatura es del primer semestre y se complementa principalmente con la de Materiales para la Nanotecnología y sirve como punto de partida para dos asignaturas del segundo cuatrimestre, la Caracterización de Materiales y Dispositivos y Física de Sensores.

El objetivo principal de este proyecto de innovación y mejora docente es elaborar los recursos de aprendizaje y autoaprendizaje que el alumno necesita para conocer las propiedades de algunos materiales desde un punto de vista electromagnético. El planteamiento de la asignatura se ha realizado desde un punto de vista teórico-práctico, donde además de los conocimientos teóricos que tiene que adquirir el

alumno, éste se familiarice con una serie de experiencias y técnicas de medida, que le permitieran una caracterización básica electromagnética de los materiales. Se ha preparado el material didáctico más adecuado, de manera que permita al alumno el estudio de la asignatura indicada anteriormente de la manera más efectiva posible. Una parte importante de la docencia es de carácter experimental y, por ello, se ha tratado de elaborar un conjunto de experiencias para que el alumno adquiriera habilidad y destreza en el manejo de algunos equipos prácticos para el estudio de las propiedades de ciertos materiales por su interés en aplicaciones tecnológicas. También, se han preparado algunas experiencias de simulación para realizar en el aula de informática.

Hay que indicar que el material necesario para realizar las experiencias prácticas de laboratorio se ha conseguido por las siguientes vías:

- Financiación del presente proyecto: ha permitido adquirir una sonda de 4 puntas BSCCO para la caracterización de un material superconductor y un criostato de arena para analizar su comportamiento con la temperatura.
- Uso del equipamiento e infraestructura existente en el laboratorio del área de Electromagnetismo en la Facultad de Física.

### III. Cumplimiento de objetivos

El objetivo fundamental del presente proyecto era que el alumno conozca en detalle las propiedades básicas electromagnéticas de algunos materiales de gran importancia para aplicaciones tecnológicas. Por ello, se han realizado una serie de transparencias, empleadas en las clases magistrales, donde se ha explicado los puntos más importantes e interesante de dichas propiedades. Esto permitirá al alumno adquirir una buena base de conocimiento sobre materiales electromagnéticos. Para complementar la parte teórica se han diseñado y preparado una serie de experiencias de laboratorio. Aunque ya disponíamos de algunas prácticas, ha sido necesario mejorarlas y desarrollar algunas nuevas para completar la caracterización de los materiales. Con el presupuesto del proyecto de innovación hemos comprado un equipo que nos ha permitido preparar una serie de experiencias para estudiar las propiedades electromagnéticas de los materiales superconductores. Por otro lado, en el diseño de dispositivos tecnológicos actuales es de gran importancia la caracterización de los materiales empleados en su fabricación, por ello en muchas ocasiones se realizan simulaciones para analizar su comportamiento. Teniendo en cuenta lo indicado anteriormente, hemos preparado algunas prácticas de simulación que permiten al alumno estudiar el comportamiento micromagnético de algunos materiales.

En conclusión, podemos decir que se han elaborado un conjunto de presentaciones, experiencias, guiones de prácticas y se propusieron un conjunto de tareas o trabajos, todo ello para que los estudiantes adquieran las competencias y resultados de aprendizaje más adecuados.

En todos los casos el material ha sido accesible a los estudiantes en la plataforma Studium de la Universidad de Salamanca, accediendo a la correspondiente asignatura. Se incluyen algunos ejemplos en los anexos de la memoria.

A continuación se indica el material didáctico elaborado por los miembros del proyecto:

- Presentaciones que han permitido preparar las clases magistrales, donde el profesor ha explicado los contenidos propios de la materia (anexo I).
- Se han diseñado distintas experiencias para realizar en el laboratorio y en el aula informática y se ha preparado el siguiente material didáctico:

Guion de práctica para realizar las experiencias (anexo II)

Presentación teórica introductoria a las prácticas de simulación del aula de informática (anexo III)

- Colección de tareas para realizar el alumno (anexo IV).

Por otro lado, el proyecto de innovación docente se ha desarrollado según lo previsto en la solicitud. El material didáctico necesario para que el alumno adquiriera los conocimientos teóricos de las asignaturas ha sido realizado principalmente por profesor D. Marcelino Zazo Rodríguez. El desarrollo de las experiencias prácticas de la asignatura ha sido realizado por los profesores D. Luis Torres Rincón y D. Luis López Díaz, y la parte correspondiente a la simulación en el aula de informática, fue llevada a cabo por la profesora D<sup>a</sup>. María Auxiliadora Hernández López. En cualquier caso, ha existido una comunicación continua y fluida entre los profesores para conseguir una asignatura compacta, de manera que el alumno haya podido adquirir las competencias asignadas a dicha asignatura.

#### **IV.- Memoria económica**

En el proyecto de innovación y mejora de docente presentado se solicitaban 349 € para comprar un equipo para la caracterización electromagnética de materiales superconductores. El precio final del material fue de 338,80 €. La financiación concedida por el proyecto de innovación fue de 180 €, que se ha complementado con el dinero asignado al departamento, de manera que se ha podido adquirir el equipo. Con el equipamiento e infraestructura existente en el laboratorio del área de Electromagnetismo de la Facultad de Física y el material comprado hemos diseñado y preparado alguna de las experiencias del laboratorio para la caracterización de materiales superconductores.

## EJEMPLO DE PRESENTACIÓN DE UNA CLASE MAGISTRAL

V. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

- I. Introducción al magnetismo.
- II. Teoría del diamagnetismo.
- III. Teoría clásica del paramagnetismo.
- IV. Teoría cuántica del paramagnetismo.
- V. Sustancias paramagnéticas.

# Medios Magnéticos

Bibliografía: Cullity, B.D.: "Introduction to Magnetic Materials"

### Tema V. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

#### V.1 INTRODUCCIÓN AL MAGNETISMO

- De forma general:  $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$ ; con  $\vec{M} = \left\langle \sum_{i=1}^N \vec{m}_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \right\rangle$
- Algunos materiales:  $\vec{M} = \chi \vec{H} \Rightarrow \vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu \vec{H}$
- Las propiedades magnéticas de estos materiales depende del momento magnético de sus átomos:

$$\vec{m}_{\text{atomo}} = \sum \vec{m}_i = \sum (\vec{m}_{\text{orb}} + \vec{m}_{\text{spin}})$$

- Clasificación de sustancias magnéticas:

#### Diamagnéticas

$$\vec{m} = 0 \Rightarrow \text{si } \vec{H} = 0, \vec{M} = 0$$

$$\Rightarrow \text{si } \vec{H} \neq 0, \vec{M} = -\chi_m \vec{H} \text{ con } \chi_m < 0$$

Cobre:  $\chi_m = -0.98 \cdot 10^{-5}$



#### Paramagnéticas

$$\vec{m} = 0 \Rightarrow \text{si } \vec{H} = 0, \vec{M} = 0$$

$$\Rightarrow \text{si } \vec{H} \neq 0, \vec{M} = \chi_m \vec{H} \text{ con } \chi_m > 0$$

Aluminio:  $\chi_m = 2.3 \cdot 10^{-5}$



#### Ferromagnéticas

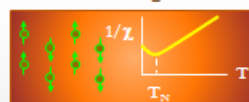
$$\vec{m} = 0 \Rightarrow \text{si } \vec{H} = 0, \text{ puede } \vec{M} \neq 0$$

$$\Rightarrow \text{si } \vec{H} \neq 0, \vec{M} \text{ muy intensa}$$

Hierro, Cobalto, Níquel



#### Antiferromagnéticas



#### Ferrimagnéticas



### Tema V. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

#### V.1 INTRODUCCIÓN

Magnitud	S.I.		Factor de conversión	C.G.S.	
	Unidades	Fórmula		Unidades	Fórmula
Energía Potencial U	J	$-mH \cos \theta$	$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$	Ergios erg	
Campo magnético H	A/m	H	$1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$ $1 \text{ Oe} = 10^3 / 4\pi \approx 80 \text{ A/m}$	Oersted Oe	
Inducción magnética B	Tesla T	$\mu_0 (H + M)$	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ $1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$	Gauss G	$H + 4\pi M$
Magnetización M	A/m	$N m$ $N = N_A \cdot p / p_m$	$1 \text{ A/m} = 10^{-3} \text{ emu/cm}^2$ $1 \text{ emu/cm}^2 = 4\pi \cdot 10^3 \text{ Oe}$	emu/cm <sup>2</sup> [4πM] = Oe	
Magnetización específica σ	A m <sup>2</sup> /kg	$(N_A / p_m) m$ $M / \rho$	$1 \text{ A m}^2/\text{kg} = 1 \text{ emu/g}$	emu/g	
Momento magnética m	A m <sup>2</sup> Wb m	I · S espira de corriente	$1 \text{ A m}^2 = 10^3 \text{ emu}$ $1 \text{ Wb m} = 4\pi \cdot 10^{10} \text{ emu}$	emu 1 emu = 1 erg/Oe	
Susceptibilidad χ		M/H	$1 (\text{emu/cm}^2)/\text{Oe} = 4\pi$	(emu/cm <sup>2</sup> )/Oe	
Permeabilidad μ	H/m T/(A/m)	B/H = μ <sub>0</sub> (1 + χ)	$1 \text{ T}/(\text{A/m}) = 1 / 4\pi \cdot 10^{-7}$		$B/H = \mu_0 (1 + 4\pi \chi)$

$$\mu_0 = 1 (\text{c.g.s.})$$

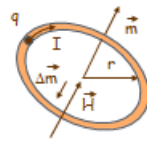
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m (S.I.)}$$



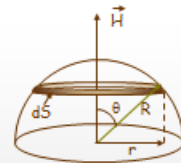
## Tema V. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

### V.2 TEORÍA DEL DIAMAGNETISMO

Teoría clásica de Langevin:



$$\Delta \vec{m} = -\frac{\mu_0 q^2 r^2}{4m_e} \vec{H}$$



$$\Delta \vec{m}_{\text{atomo}} = -\frac{\mu_0 q^2 Z R^2}{6m_e} \vec{H} \Rightarrow \chi = -\frac{N_A \rho}{P_m} \frac{\mu_0 q^2 Z R^2}{6m_e}$$

× Susceptibilidad independiente de la temperatura.

× Materiales:

- Con capas electrónicas completas:
  - Gases nobles (He, Ne, ...)
  - Gases poliatómicos (H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)
  - Sólidos iónicos (NaCl)
  - Carbono, Silicio, Germanio.
- Superconductores

Material	$\chi$
Bismuto	$-1.6 \cdot 10^{-4}$
Oro	$-3.4 \cdot 10^{-5}$
Cobre	$-9.7 \cdot 10^{-6}$
Plata	$-2.4 \cdot 10^{-5}$
Agua	$-9.0 \cdot 10^{-6}$
Carbono	$-1.9 \cdot 10^{-5}$

## Tema V. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

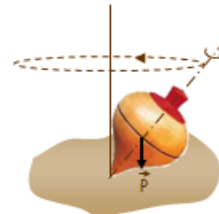
### V.3 TEORÍA CLÁSICA DEL PARAMAGNETISMO

Teoría clásica de Langevin:

$$M = M_0 \left[ \coth a - \frac{1}{a} \right] = M_0 L(a) \quad a = \frac{mH}{k_B T}$$

$$\text{Si } a \ll 1 \Rightarrow M = Nm \frac{a}{3} = \frac{Nm^2 H}{3k_B T} \Rightarrow \chi = \frac{Nm^2}{3k_B T} = \frac{C}{T}$$

Ley de Curie

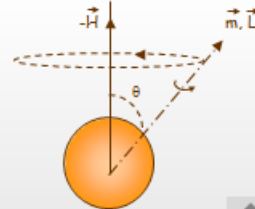


Campo molecular de Weiss:

$$H_m = \gamma M$$

$$M = \frac{C}{T - C\gamma} H \Rightarrow \chi = \frac{C}{T - \theta}$$

Ley de Curie-Weiss



## Tema V. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

### V.4 TEORÍA CUÁNTICA DEL PARAMAGNETISMO

Modelo cuántico:

$$\vec{m}_H = g M_J \vec{m}_B \quad m_{\text{eff}} = g \sqrt{J(J+1)} m_B$$

$$M_J = J, J-1, J-2, \dots, -(J-1), -J$$

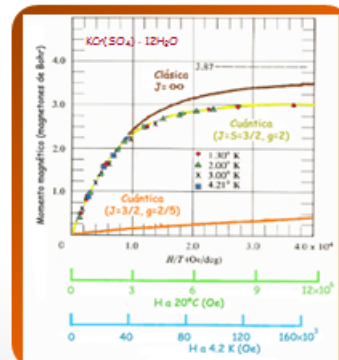
Ecuación de Landé

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

$$M = NgJm_B \left[ \frac{2J+1}{2J} \coth \left( \left( \frac{2J+1}{2J} \right) a' \right) - \frac{1}{2J} \coth \frac{a'}{2J} \right]$$

$$a' = \frac{gJm_B H}{k_B T} = \frac{m_{H,\text{max}} H}{k_B T}$$

$$M = M_0 B(J, a')$$



## Anexo II

### EJEMPLO DE GUION DE PRÁCTICA DE UNA EXPERIENCIA

#### DEPENDENCIA DE LAS PROPIEDADES CON LA TEMPERATURA DE UN SUPERCONDUCTOR DE ELEVADA TEMPERATURA CRÍTICA

##### Planteamiento

En el año 1911, el científico holandés Kamerlingh Onnes, de la Universidad de Leiden, logró reducir la temperatura de una muestra de mercurio a la del helio líquido observando una notable propiedad. Se dio cuenta de que la resistividad eléctrica del mercurio por debajo de su temperatura crítica ( $T_c = 4.15\text{K}$ ) se hacía nula, lo que se denominó superconductividad. Estos materiales superconductores presentan también un diamagnetismo perfecto. En efecto, años más tarde, en 1933, los científicos Meissner y Ochsenfeld descubrieron que los materiales superconductores tienen la propiedad de repeler el campo magnético actuando como un material diamagnético perfecto (susceptibilidad magnética  $\chi_m = -1$ ). Esto es conocido como efecto Meissner y es tan intenso que se puede hacer levitar a un imán colocado sobre un material superconductor.

Las perspectivas de aplicación de estos materiales resultaron pronto evidentes de forma que se impulsó fuertemente la investigación encaminada a conseguir nuevos materiales superconductores con temperaturas críticas cada vez mayores. En 1962, la compañía Westinghouse desarrolló el primer cable superconductor comercial, una aleación de niobio y titanio. Pero no fue hasta 1986 cuando se descubrieron materiales con temperaturas críticas claramente superiores. Bednorz y Müller, investigadores del IBM Research Laboratory de Zurich, encontraron un compuesto cerámico superconductor, Ba-La-Cu-O, con la más alta temperatura registrada hasta entonces (35-38K). Este descubrimiento, (que les hizo merecedores del Premio Nobel de Física en el año 1987), fue especialmente notable ya que generalmente las cerámicas son aislantes. Multitud de laboratorios de todo el mundo compitieron por conseguir superconductores de alta temperatura crítica. Entre las composiciones de interés destaca la serie de Y-Ba-Cu-O ( $T_c = 93\text{K}$ ) y otras de mayor temperatura crítica, pues permiten trabajar sin recurrir al helio líquido realizando las experiencias con nitrógeno líquido (mucho más barato) cuya temperatura de ebullición es 77K. Actualmente, el récord mundial de temperatura crítica para un superconductor es de 138K y es un material compuesto de mercurio, talio, bario, calcio, cobre y oxígeno. Bajo presiones extremas ( $3 \times 10^5$  atmósferas) su temperatura puede subir unos 25 o 30 grados más. En la tabla se muestran algunos superconductores y sus temperaturas críticas.

Elementos superconductores tipo I	$T_c$ (K)	Compuestos superconductores tipo II	$T_c$ (K)
Pt	0.0019	AuZn <sub>3</sub>	1.21
In	3.40	Nb <sub>0.6</sub> Ti <sub>0.4</sub>	9.8
Sn	3.72	(La,Ba) <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub>	35-38
Hg	4.15	Yba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7+</sub>	93
Pb	7.2	Bi <sub>1.6</sub> Pb <sub>0.6</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Sb <sub>0.1</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	115
C	15	Hg <sub>0.8</sub> Tl <sub>0.2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8.33</sub>	138

Los superconductores (tipo I y II) se describen atendiendo a la transición entre el estado normal y el superconductor. En los de tipo I, y de acuerdo al efecto Meissner (figura 1), para campos magnéticos aplicados menores que el campo crítico  $H_c$ , la inducción magnética no penetra en la muestra superconductora y esta permanece en ese estado. Para campos mayores que  $H_c$ , la inducción penetra y el estado superconductor se destruye pasando la muestra al estado normal. Existen otros tipos de superconductores, llamados tipo II, en los que el comportamiento magnético es más complicado. Para

campos magnéticos bajos, el flujo se excluye completamente del material superconductor, lo que persiste hasta un campo magnético crítico bajo  $H_{c1}$ . Para campos por encima de este valor, el flujo penetra parcialmente formando vórtices de corriente (figura 2), pero la superconductividad no se destruye hasta que el flujo penetra completamente en el material. Ello ocurre para el campo crítico alto  $H_{c2}$ . Entre  $H_{c1}$  y  $H_{c2}$ , el material tipo II no presenta efecto Meissner perfecto. Los superconductores tipo I corresponden esencialmente a metales puros que normalmente muestran elevada conductividad a temperatura ambiente. Los superconductores tipo II comprenden generalmente componentes metálicos y mezclas de ellos (óxidos de cobre; véase la tabla) que se comportan como aislantes a temperatura ambiente. Estos materiales superconductores alcanzan  $T_c$  y  $H_c$  mayores en comparación con los de tipo I, por un mecanismo que todavía no se ha explicado satisfactoriamente. En la figura 3 se muestra el comportamiento de ambos tipos de superconductores.

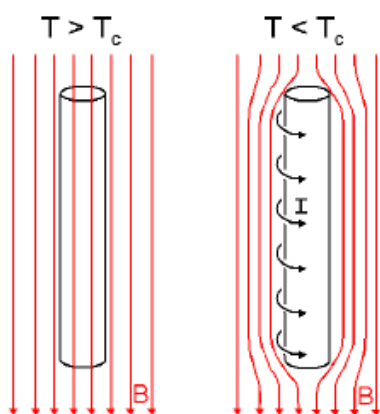


Figura 1

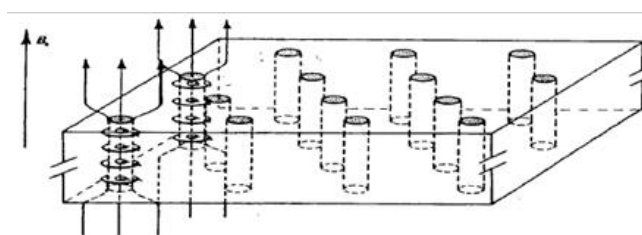


Figura 2

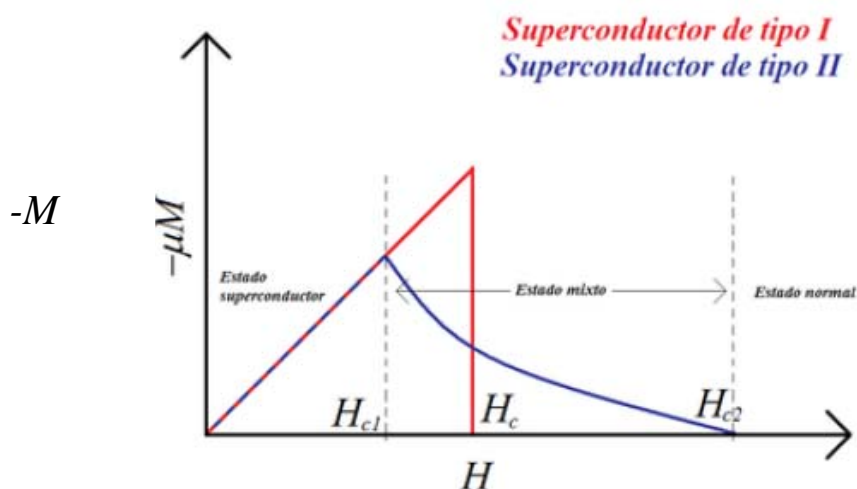
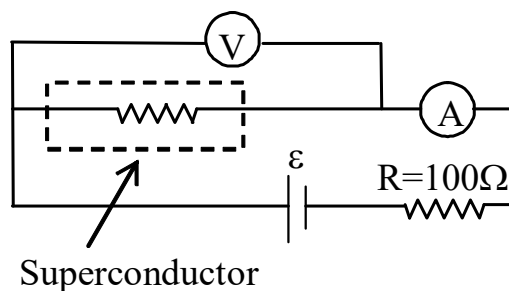


Figura 3

### Experiencia 1: Resistencia frente a temperatura

En esta práctica vamos a analizar experimentalmente las propiedades de un superconductor de elevada temperatura crítica. Para ello analizaremos en primer lugar la variación de la resistencia con la temperatura tras introducir la muestra en nitrógeno líquido.

Para su realización práctica realizaremos el siguiente montaje:



A partir de las medidas del voltaje y de la corriente en función de la temperatura podemos obtener el valor de la resistencia del superconductor. Para obtener la temperatura de la muestra es necesario medir el voltaje entre los terminales del termopar. Mediante la tabla siguiente se puede obtener la temperatura a partir del voltaje. Una medida de  $-0.04 \text{ mV}$  indica la temperatura ambiente (298K) y  $+6.57 \text{ mV}$  corresponde a 77 K.

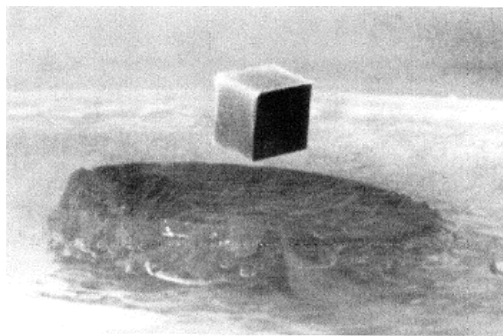
K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
70	6.84	6.80	6.76	6.72	6.69	6.50	6.61	6.57	6.54	6.50	6.46
80	6.46	6.43	6.39	6.35	6.32	6.28	6.24	6.20	6.17	6.13	6.09
90	6.09	6.05	6.02	5.98	5.94	5.90	5.87	5.83	5.79	5.76	5.72
100	5.72	5.68	5.65	5.61	5.57	5.53	5.50	5.46	5.42	5.39	5.35
110	5.35	5.31	5.27	5.24	5.20	5.16	5.12	5.09	5.05	5.01	4.97

Para su realización práctica se dispone de una fuente de corriente continua, varios multímetros, una caja de resistencia y un criostato de nitrógeno líquido. El trabajo se compone de las siguientes etapas:

1. Realizar el montaje de la figura anterior. Es necesario colocar una resistencia de  $100 \Omega$  para proteger al superconductor y mantener la corriente constante. Ajustar el voltaje de la fuente a unos 30V. No sobrepasar nunca la corriente de 0.5 A. Conectar el termopar a un voltímetro para poder obtener el valor de la temperatura.
2. Se enfría la muestra hasta la temperatura más próxima a 77 K. Dejar que se caliente lentamente hasta 120 K y anotar periódicamente el voltaje del superconductor, la corriente que circula a través de ella y el voltaje del termopar. Es conveniente tomar la medida cada  $0.02 \text{ mV}$  del termopar.
3. Obtener el valor de la resistencia del superconductor mediante la ley de Ohm, representar gráficamente y comentar los resultados.
4. ¿Por qué acarrea tantas dificultades estudiar la transición al estado superconductor mediante medidas de resistividad?

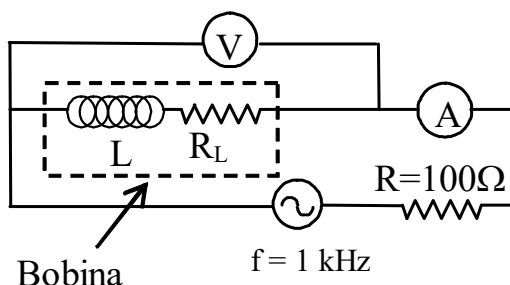
## Experiencia 2: Susceptibilidad magnética frente a temperatura

En primer lugar vamos a visualizar la existencia del efecto Meissner mediante una experiencia muy sencilla. Un superconductor por debajo de su temperatura crítica  $T_c$  expulsa el campo magnético de su interior. Esto implica que si un imán es situado encima del superconductor, éste expulsaría el campo magnético del imán, de manera que es repelido y levitaría (figura 4).



**Figura 4**

En esta práctica también vamos a analizar experimentalmente la transición superconductora, en ausencia de campo externo estático  $H$ , de una muestra de YBaCuO. Para ello en lugar de medir la conductividad del material, estudiaremos su susceptibilidad magnética colocando la muestra como núcleo de una bobina. La autoinducción  $L$  de la bobina resultará dependiente de la susceptibilidad del núcleo, de forma que midiendo aquella podemos observar la transición al estado superconductor y el comportamiento tipo II de la muestra. Para realizar la medida de la autoinducción realizaremos el siguiente montaje.



A partir de las medidas del voltaje, de la corriente y de la resistencia  $R_L$  en función de la temperatura podemos obtener el valor  $L$  de la autoinducción de la bobina. Para obtener la temperatura de la muestra es necesario medir el voltaje entre los terminales del termopar. Mediante la tabla siguiente se puede obtener la temperatura a partir del voltaje. Una medida de  $-0.06 \text{ mV}$  indica la temperatura ambiente (298K) y  $+6.42 \text{ mV}$  corresponde a  $77 \text{ K}$ .

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
70	6.92	6.85	6.78	6.71	6.64	6.56	6.49	6.42	6.37	6.33	6.29
80	6.29	6.25	6.21	6.17	6.13	6.09	6.05	6.01	5.97	5.93	5.9
90	5.9	5.86	5.83	5.79	5.75	5.72	5.68	5.64	5.6	5.56	5.52
100	5.52	5.48	5.44	5.41	5.37	5.34	5.3	5.27	5.23	5.2	5.16

Para su realización práctica se dispone de un generador de funciones, varios multímetros, una caja de resistencia y un criostato de nitrógeno líquido. El trabajo se compone de las siguientes etapas:

- Realizar el montaje de la figura anterior. Es necesario colocar una resistencia de  $100 \Omega$  para proteger la bobina. Ajustar la frecuencia del generador a  $1 \text{ kHz}$ . Conectar el termopar a un voltímetro para poder obtener el valor de la temperatura.
- Se enfría la muestra hasta la temperatura más próxima a  $77 \text{ K}$ . Dejar que se caliente lentamente hasta  $110 \text{ K}$  y anotar periódicamente el voltaje de la bobina y la corriente que circula a través de ella y el voltaje del termopar. Es conveniente tomar la medida cada  $0.02 \text{ mV}$  del termopar.

7. La resistencia  $R_L$  de la bobina depende de la temperatura, por lo tanto es necesario determinar su variación con ella. Para ello sería necesario enfriar de nuevo la muestra. Se conectaría directamente la bobina a un ohmímetro y dejaríamos que la muestra se caliente hasta 110 K. Como el proceso de medida es largo no se va a realizar. Para determinar su valor se puede utilizar la siguiente recta de ajuste:

$$R_L(\Omega) = 0.051 T(K) + 0.4911$$

8. Representar los valores del voltaje y la impedancia de la bobina en función de la temperatura.
9. Obtener los resultados de la inducción de la bobina (L) a partir de los valores de su impedancia y su resistencia, representar gráficamente y comentar los resultados.
10. ¿Cómo se podría obtener el valor de la susceptibilidad magnética a partir de la autoinducción de bobina?

## Anexo III

### EJEMPLO DE PRESENTACIÓN TEÓRICA INTRODUCTORIA A LAS PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN EN EL AULA DE INFORMÁTICA

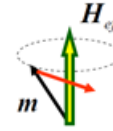
#### Simulaciones de micromagnetismo.

##### DINÁMICA Y RELAJACIÓN

Dinámica descrita por la Segunda Ley de Newton:

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{eff}$$

Precessional torque

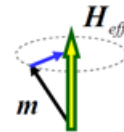


$$\gamma_0 = \mu_0 \frac{g |\mu_B|}{\hbar} = 2.21 \times 10^5 \frac{m}{A \cdot s}$$

Amortiguamiento del torque (fenomenológico):

$$\vec{H}_{eff} \rightarrow \vec{H}_{eff} - \frac{\alpha}{\gamma_0} \frac{d\vec{m}}{dt}$$

Damping torque



• Several physical mechanisms are responsible of damping.

- |                                  |                          |
|----------------------------------|--------------------------|
| Two-magnon process               | Spin-spin interaction    |
| Electron scattering relaxation   | Magnon-phonon relaxation |
| Fast relaxing impurity processes | eddy losses, etc...      |

#### Simulaciones de micromagnetismo.

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{eff} \rightarrow \frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{eff} + \alpha \vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt}$$

Ecuación de Gilbert

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{eff} + \alpha \vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt}$$

Gilbert eq.

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{eff} + \alpha_G \left( \vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt} \right)$$

Gilbert Damping parameter

Landau-Lifshitz eq.

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{eff} - \alpha_{LL} \gamma_0 \vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{H}_{eff})$$

Landau-Lifshitz Damping parameter

Landau-Lifshitz Gilbert eq.

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\frac{\gamma_0}{1+\alpha^2} \vec{m} \times \vec{H}_{eff} - \alpha_G \frac{\gamma_0}{1+\alpha^2} \vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{H}_{eff})$$

#### Simulaciones de micromagnetismo.

Ecuación de Landau-Lifshitz Gilbert

$$\frac{d\vec{m}(\vec{r}, t)}{dt} = -\frac{\gamma_0}{1+\alpha^2} \vec{m}(\vec{r}, t) \times \vec{H}_{eff}(\vec{r}, t) - \alpha \frac{\gamma_0}{1+\alpha^2} \vec{m}(\vec{r}, t) \times (\vec{m}(\vec{r}, t) \times \vec{H}_{eff}(\vec{r}, t))$$

Ecuación integro-diferencial no-lineal

Campo Efectivo:

$$\vec{H}_{eff} = \frac{2}{\mu_0 \cdot M_s} \nabla \cdot (A \nabla \vec{m}) - \frac{1}{\mu_0 \cdot M_s} \frac{\partial f_{anis}}{\partial \vec{m}} + \vec{H}_d + \vec{H}_{ext}$$

Campo desmagnetizante:

$$\vec{H}_d = -\frac{1}{4\pi} \int_{V'} [-\nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')] \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' + \int_{V'} [\vec{M}(\vec{r}') \cdot \vec{n}(\vec{r}')] \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds'$$

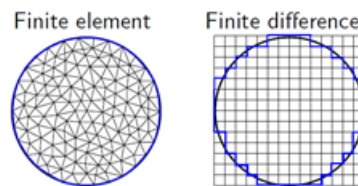
Non-local: depends on the magnetization over the whole sample

### The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF)

OOMMF is a project in the Applied and Computational Mathematics Division (ACMD) of ITL/NIST, in close cooperation with  $\mu$ MAG, aimed at developing portable, extensible public domain programs and tools for micromagnetics. The end product will be a fully functional micromagnetic code, with a well documented, flexible programmer's interface to allow developers outside the OOMMF project to swap their own code in and out as desired. The guts of the code are being written in C++ with a Tcl/Tk (and in the future, possibly OpenGL) interface. Target systems include a wide range of Unix platforms and Windows (9x and later). The open source scripting language Tcl/Tk is required to run OOMMF.



- Discretization in space:  $m(r, t) \rightarrow m(r_i, t) \equiv m_i(t)$



- Discretization in time:  $m_i(t) \rightarrow m_i(t_j)$ 
  - Euler, mid-point, etc.
  - Predictor-corrector, Runge-Kutta, etc.



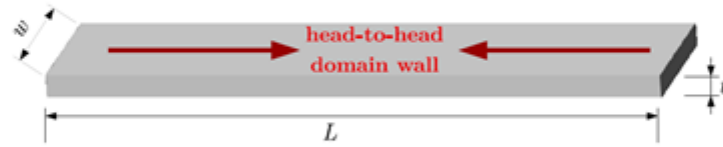
## Anexo IV

### EJEMPLO DE TAREAS INDIVIDUALES PARA EL ALUMNO Y QUE ENTREGARÁ AL PROFESOR PARA SU REVISIÓN

#### Problema 1 (simulación de micromagnetismo): Head-to-head domain walls.

Calculate the internal structure of a head-to-head domain wall in a Py nanowire of rectangular cross section in two cases:

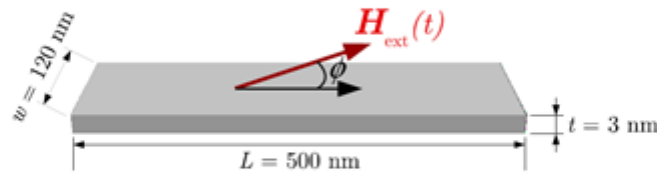
- 1  $w = 80 \text{ nm}$ ,  $t = 4 \text{ nm}$
- 2  $w = 200 \text{ nm}$ ,  $t = 20 \text{ nm}$



- $M_s = 8.0 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $A = 1.3 \times 10^{-11} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $K = 0$
- $4 \times 4 \times 4 \text{ nm}^3$  cells
- $L = 2.0 \mu\text{m}$  to avoid interaction with the edges

#### Problema 2 (simulación de micromagnetismo): Field induced switching.

- $M_s = 8.0 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $A = 1.3 \times 10^{-11} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.02$
- $2 \times 2 \times 3 \text{ nm}^3$  cells



Study the time evolution of the system in these cases:

- 1 DC field:  $B_{\text{ext}} = 200 \text{ mT}$ ,  $\phi = 170^\circ$
- 2 Square pulse:  $B_{\text{ext}} = 200 \text{ mT}$ ,  $\phi = 90^\circ$ ,  $\Delta t = 100 \text{ ps}$
- 3 Gaussian pulse:  $B_{\text{ext}}(t) = B_0 e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}$ ,  $\phi = 90^\circ$ 
  - $B_0 = 200 \text{ mT}$ ,  $t_0 = 0.75 \text{ ns}$ ,  $\sigma = 200 \text{ ps}$

## Anexo V

### FOTOGRAFÍAS DE EXPERIENCIA DE LABORATORIO

#### Montaje para la caracterización electromagnética de un superconductor



#### Criostato con portamuestra para las medidas en temperatura

